Fundamentos de Tribología

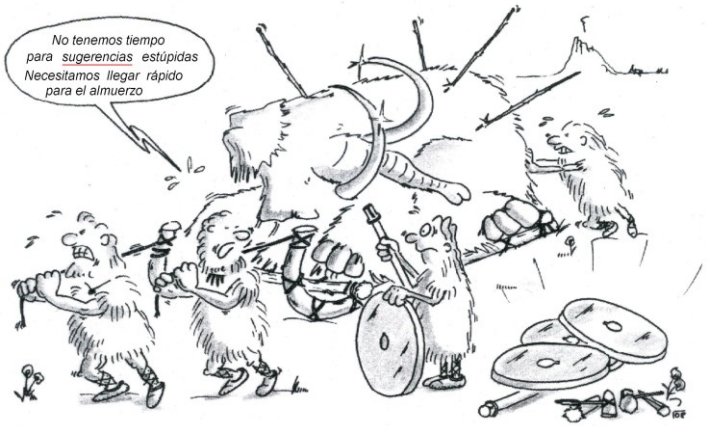
Gabriel Barrientos.

2026

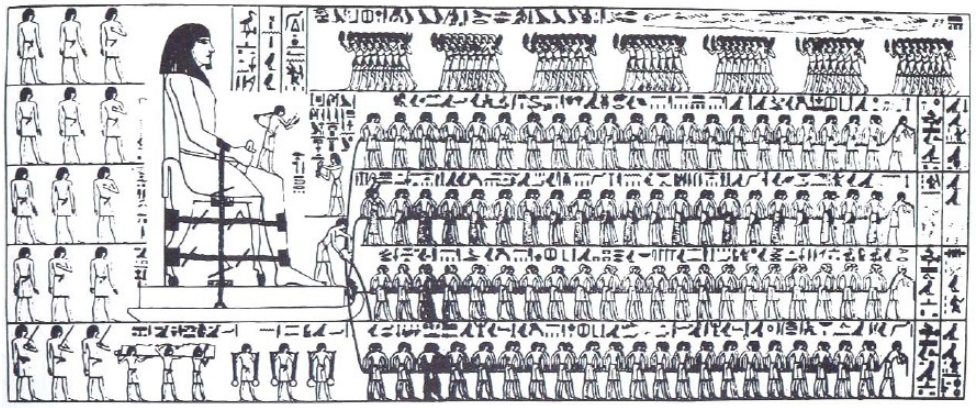
DEPARTAMENTO INGENIERIA MECANICA - UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

HISTORIA

Los carruajes egipcios de la antigüedad utilizaron grasas de plantas y animales para lubricación



PREHISTORIA: 18.800 AC



Mural datado del año 1.880 a. C. situado en la tumba de Tehuti-Hetep, El Bersheh (Egipto) [1]. Nótese la presencia del hombre situado en la parte delantera del patín y que está añadiendo un fluido en la superficie sobre la que se desliza la escultura.

- Griegos y Romanos:

Se han encontrado múltiples ejemplos de aplicaciones de lubricación en superficies con el objetivo de disminuir la fricción. Ej. Plataformas sobre esferas de bronce.

- Renacimiento: en la catedral de Salisburry (1386) se usaron engranajes de hierro forjado lubricados con grasa animal

- Leonardo Da Vinci: estudió los primeros cojinetes y rodamientos.

- Siglo XVII: Newton (1687) realizó los primeros estudios de la resistencia viscosa en fluidos.

- Osborne Reynolds (1886) asocia su teoría hidrodinámica a la lubricación de la rodilla

- Fines siglo XVIII: Coulomb demostró las hipótesis de Da Vinci y establece la diferencia entre roce estáticoo y roce dinámico

- Revolución Industrial: (1769)

Durante los siguientes 80 años se desarrollan las principales máquinas productivas y de vapor (Watts 1769) y el ferrocarril.

Nacen las primeras grasas y aceites industriales:

Primeras grasas: hidróxido de sodio con aceite de origen animal

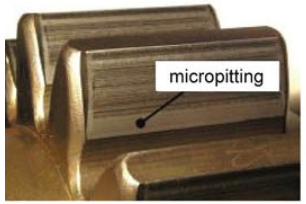
Mitad del siglo XIX: Descubrimiento del Petróleo.

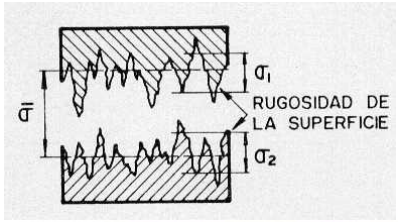
- 1857: aparecen los fluidos hidráulicos
- 1872: Otto: Motor de encendido
- 1884: Parsons: Turbina de vapor
- 1892: Motor Diesel
- 1903: Primer vuelo de los Wright
- 1909: Henry Ford
- 1914-1918: primera Guerra Mundial
- 1939- 1945: 2° Guerra Mundial

Nace la Lubricación industrial y aparece la TRIBOLOGIA

Por definición *Tribos* = *fricción* y *logos* = *tratado*. El estudio de la fricción conduce a optimizar el funcionamiento de máquinas ya que si la fricción disminuye, se pierde menor energía por ese concepto. Para muchos la palabra Tribología constituye el estudio de la *fricción*, del *degaste* y de la *lubricación* al mismo tiempo.

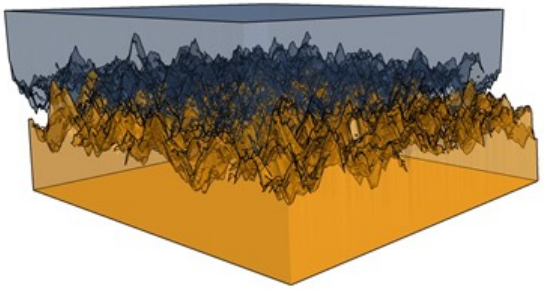
FUNCIONES BÁSICAS





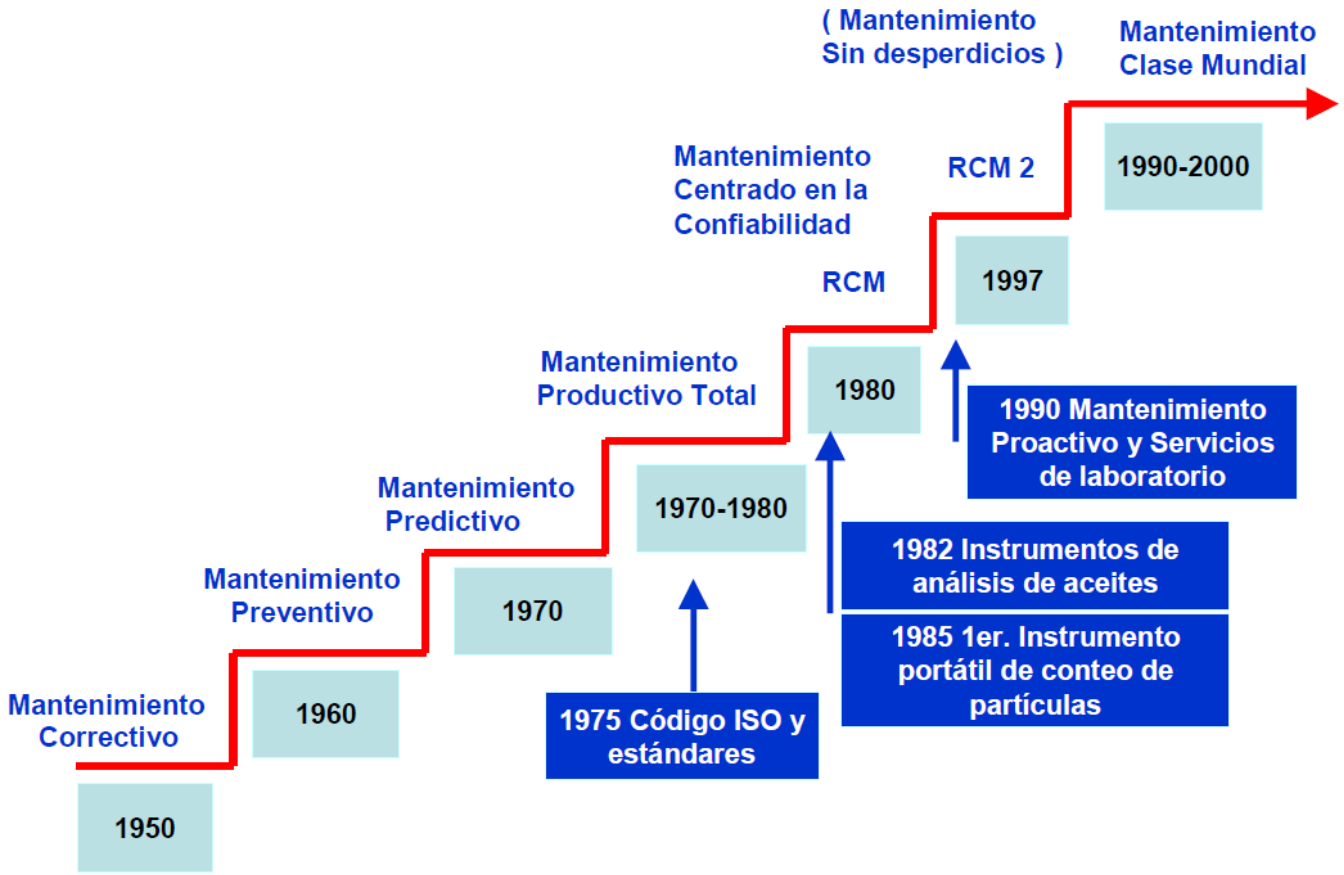
DESGASTE

FRICCION

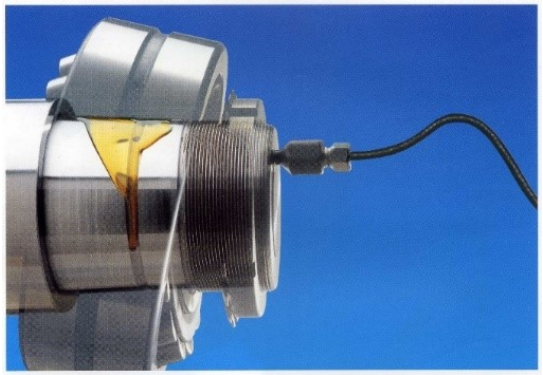


TRIBOLOGIA

LUBRICACION


(Mantenimiento Sin desperdicios)
Mantenimiento Clase Mundial
Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad
RCM 2
1990-2000
RCM
1997
Mantenimiento Productivo Total
1980
1990 Mantenimiento Proactivo y Servicios de laboratorio
Mantenimiento Predictivo
1970-1980
1982 Instrumentos de análisis de aceites
Mantenimiento Preventivo
1970
1985 1er. Instrumento portátil de conteo de partículas
Mantenimiento Correctivo
1960
1975 Código ISO y estándares
1950

EFECTOS



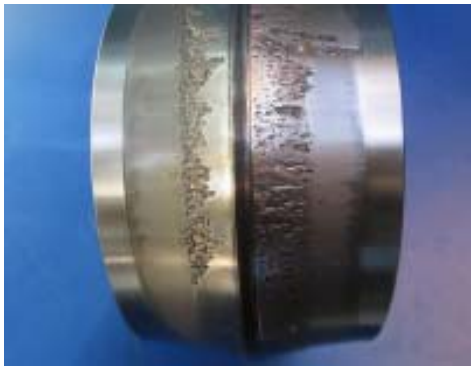
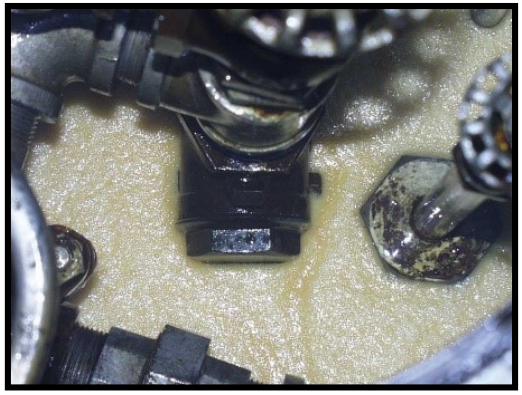
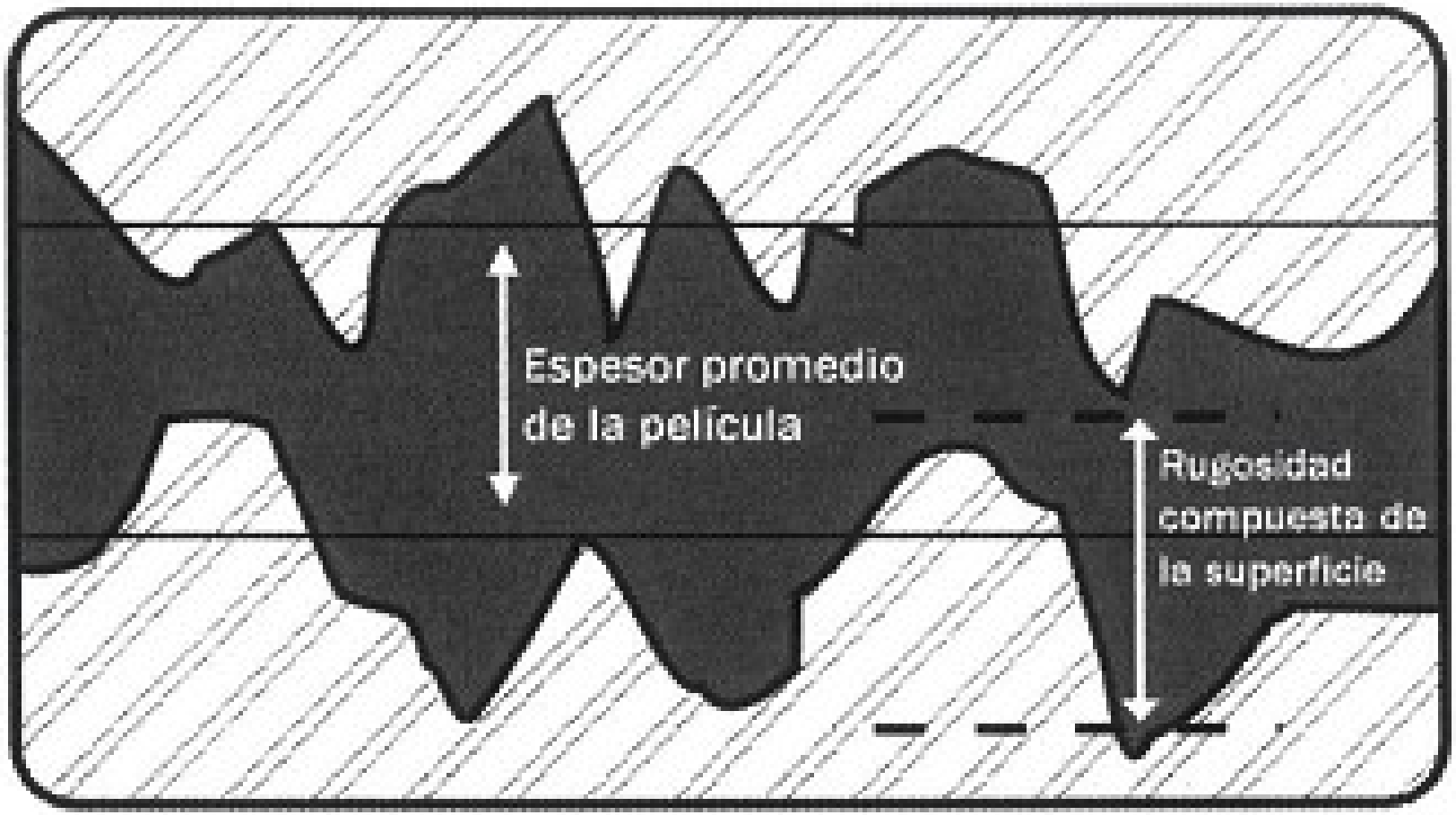
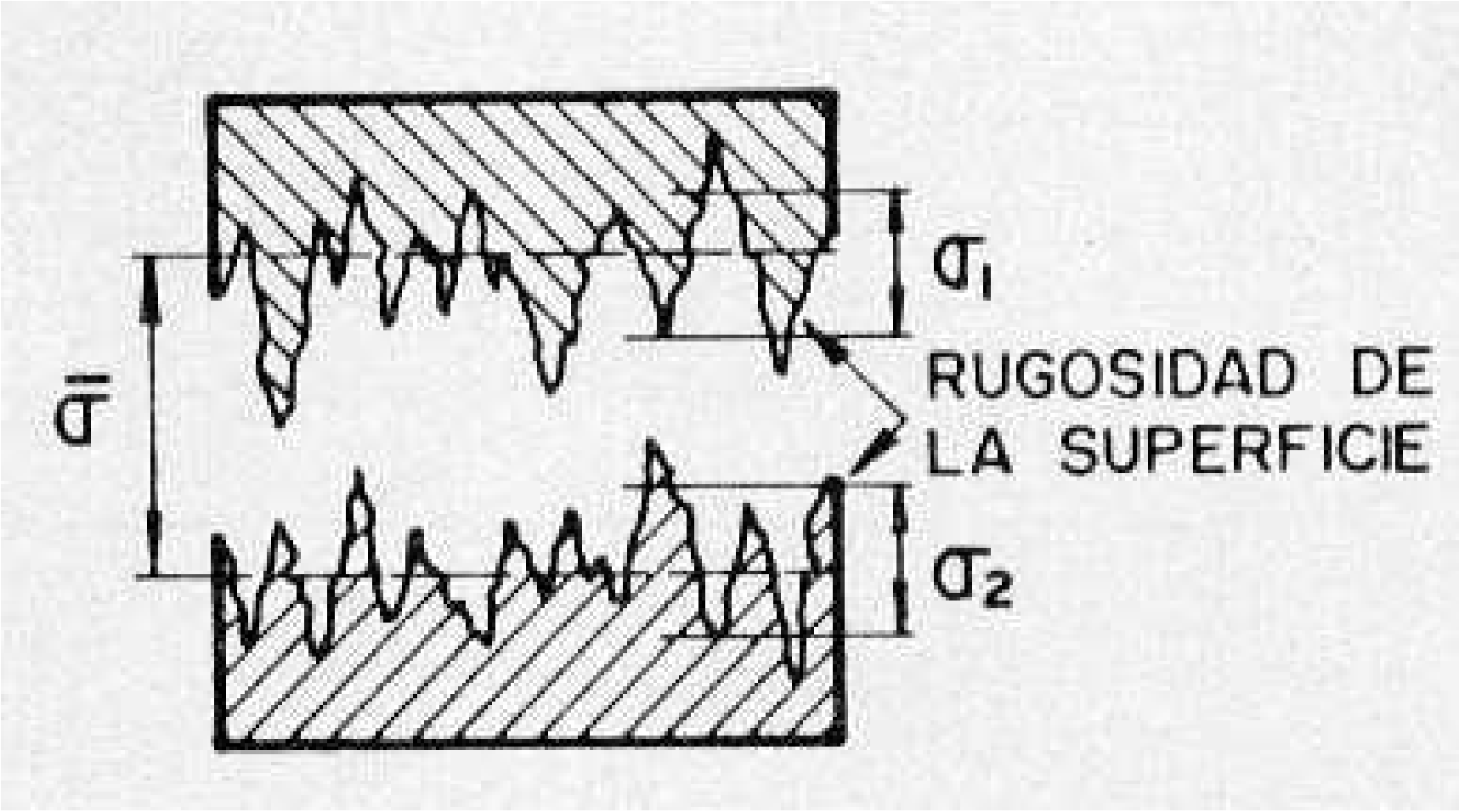


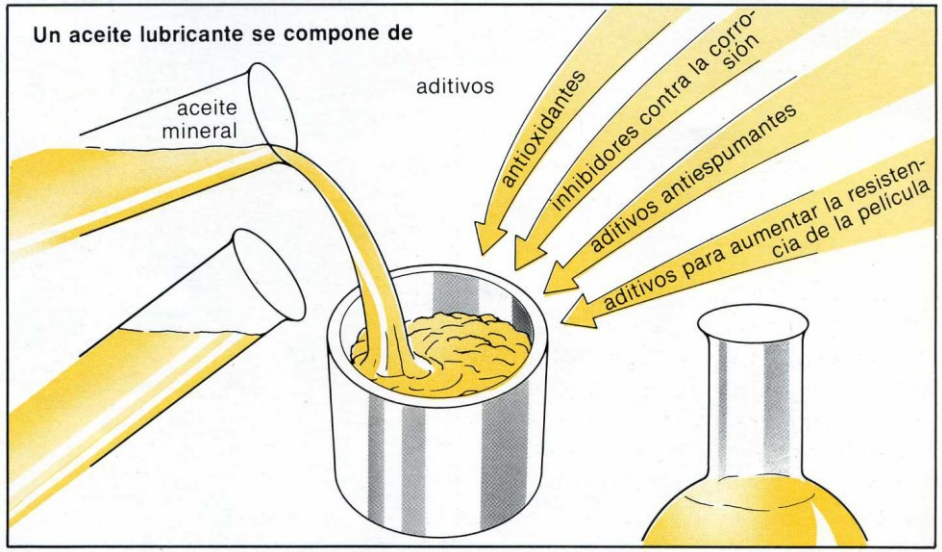
Figura 1: fractura de los dientes del piñón

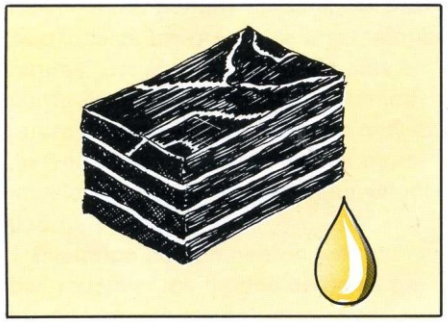


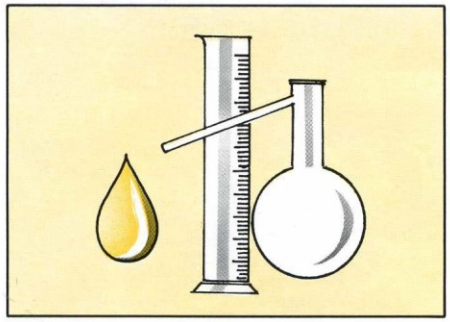

Espesor promedio
de la película
Rugosidad
compuesta de
la superficie

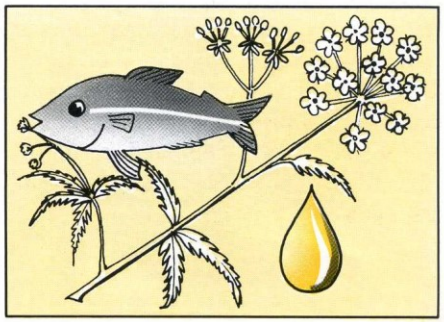
RUGOSIDAD DE LAS SUPERFICIES
(microscópicamente)









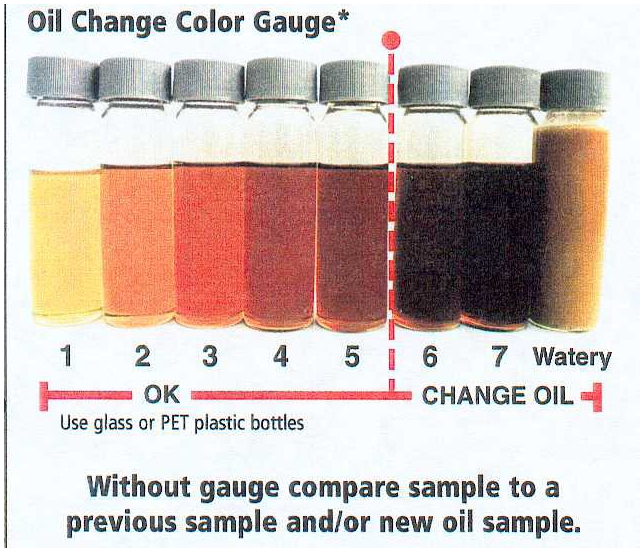


Aceites minerales
En la mayoría de los casos, los aceites más adecuados como lubricantes para rodamientos son los aceites minerales puros, refinados (neutros), y de buena calidad. Los aceites minerales puros no tienen compuestos inestables, que podrían tener un efecto significativo sobre su duración; por ejemplo, nitrógeno, oxígeno, y compuestos de azufre y ácidos.

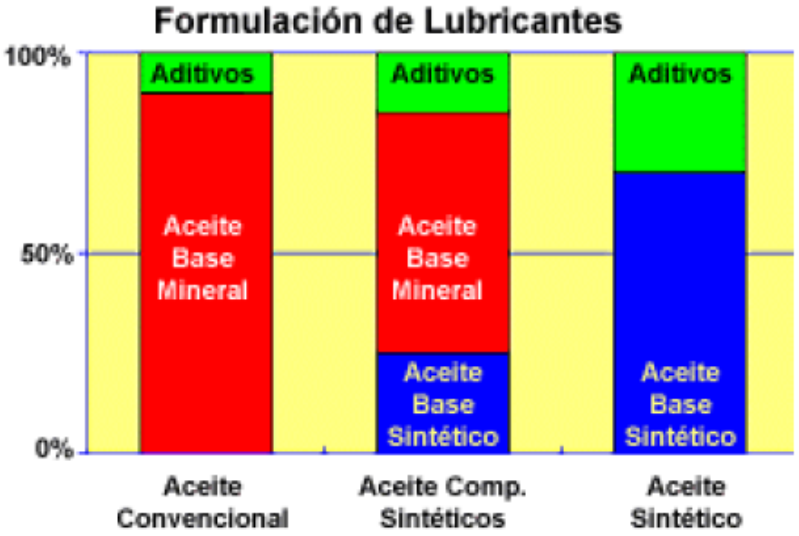
Aceites sintéticos
Los aceites sintéticos sólo son importantes para la lubricación de rodamientos en casos especiales. Se usan principalmente a temperaturas por encima de 90 °C. En la siguiente página se describen los más importantes.

Aceites de origen animal o vegetal
Los aceites de origen animal o vegetal no se deberían usar normalmente para la lubricación de rodamientos, ya que existe un riesgo de empeoramiento de la calidad o formación de ácidos después de un corto periodo. Los llamados aceites compuestos (aceites minerales con un máximo del 10 % de aceite animal o vegetal), pueden ser adecuados en casos especiales, aunque hay que seguir las recomendaciones de los fabricantes.

PRODUCTOS


Oil Change Color Gauge*
1 2 3 4 5 6 7 Watery
OK
CHANGE OIL
Use glass or PET plastic bottles
Without gauge compare sample to a previous sample and/or new oil sample.

GR


Formulación de Lubricantes
100%
50%
0%
Aditivos
Aceite Base Mineral
Aditivos
Aceite Base Mineral
Aceite Base Sintético
Aditivos
Aceite Base Sintético
Aceite Convencional
Aceite Comp. Sintéticos
Aceite Sintético

1.2. Tipos de lubricación

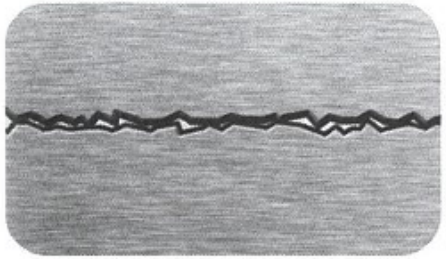
1.2.1. Lubricación Límite

1.2.2. Lubricacion Mixta

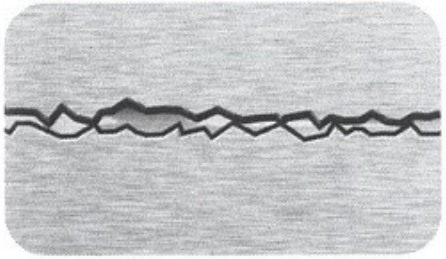
1.2.4. Lubricacion Elastohidrodinámica (EHL)

1.2.3. Lubricación Hidrodinámica

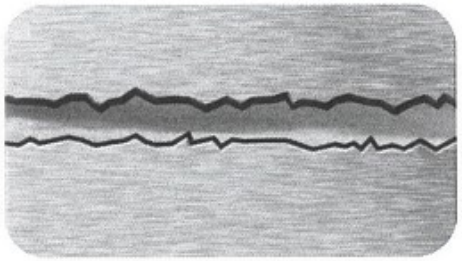
TEORIAS



Lubricación límite:
La protección depende esencialmente de la película de aditivos anti-desgaste

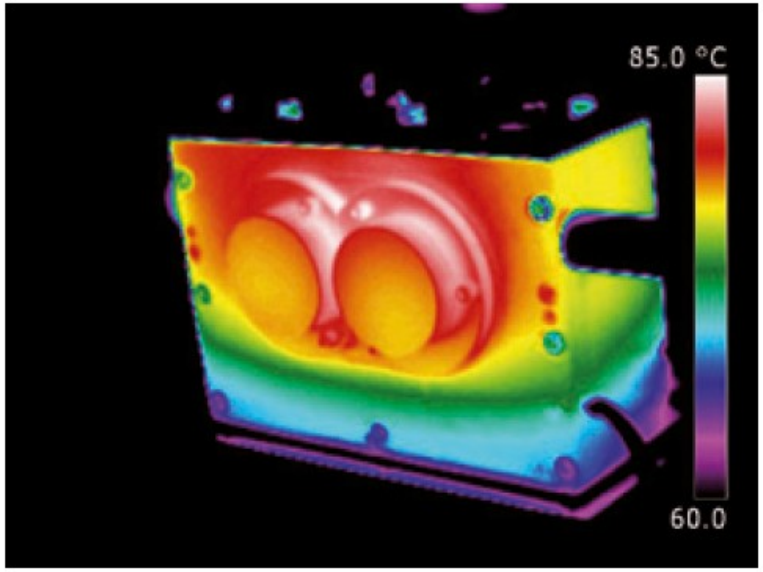


Lubricación a película mixta:
Tanto el fluido lubricante como la película límite tienen un rol

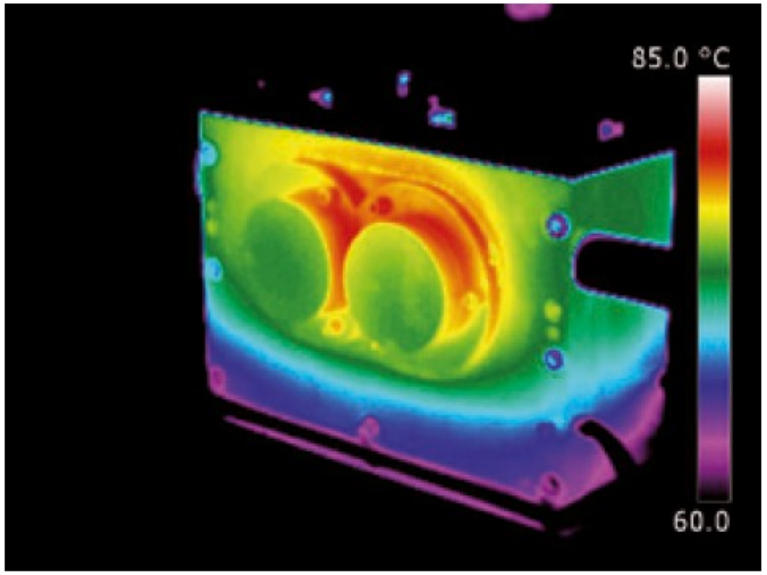


Lubricación a película fluida:
Las superficies están separadas totalmente por la película lubricante, afectada por la viscosidad, velocidad y carga

Standard gear oil
(Mineral oil, ISO VG 220)

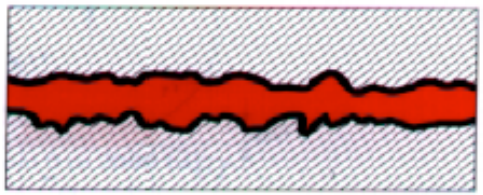


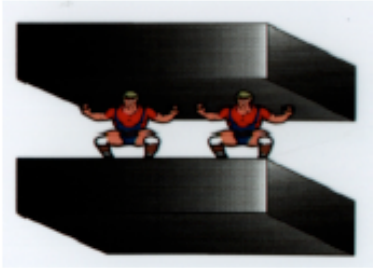
Klübersynth GEM 4-220 N
Klüberoil 4 UH1-220 N



Tres Situaciones Básicas de Lubricación

1. Película de Fluido Completo–Lubricación Hidrodinámica



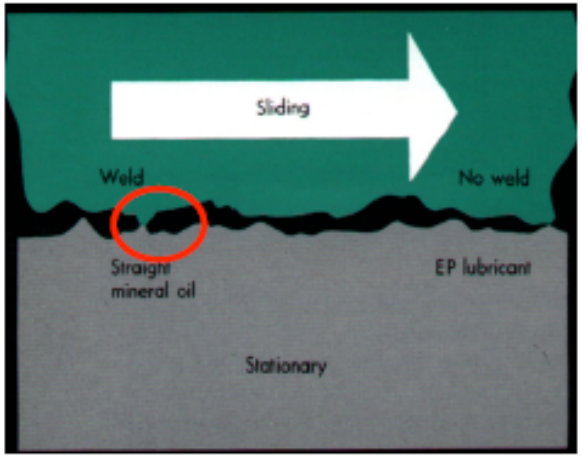


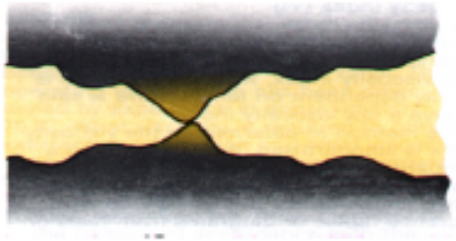
Distribución de la Presión

- Dos superficies están completamente separadas por una película de aceite
- El grosor de la película excede la irregularidad combinada de ambas superficies y previene el desgaste en las partes móviles (5-200 micrones)
- Un coeficiente de fricción muy bajo, llegando incluso a <0,005
- El grosor de la película depende predominantemente de la viscosidad del aceite, de la velocidad y de la carga
- Entre las aplicaciones a modo de ejemplo, se incluyen: el engranaje del tornillo sin fin, los rodamientos de cojinete, los puntos de contacto entre el pistón y la camisa, etc.

2. Lubricación de Límites

- El grosor de la película es del mismo orden de magnitud que las moléculas de aceite individuales
- Contacto parcial de las asperezas
- El coeficiente de fricción puede ser de hasta 0,5
- **Alta dependencia en los aditivos**
- Situaciones de lubricación reales en motores, engranajes y rodamientos.



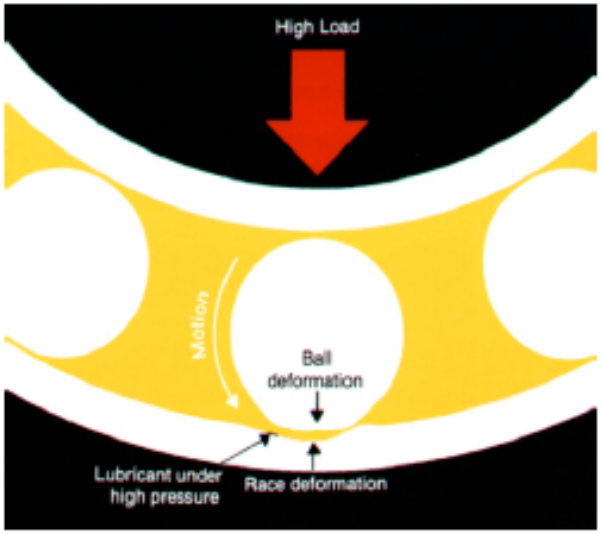


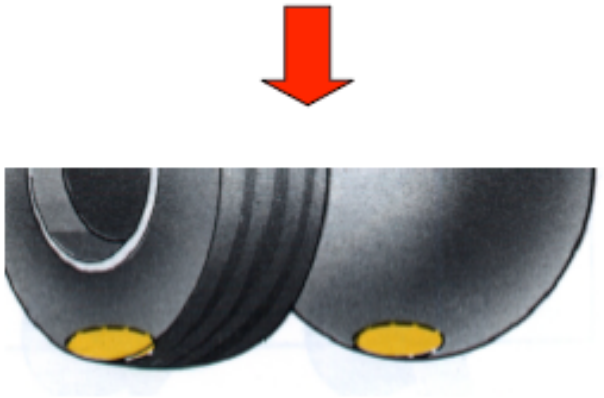
Componentes Lubricados / Separación Dinámica de Máquinas & Grosor de la Película de Aceite (Micrones)

Rodamientos de Rodillos	0,1 - 0,3
Rodamientos de Cojinetes	0,5 - 100
Engranajes	0,1 - 1
Motores	0,0 - 50

3. Lubricación Elasto-Hidrodinámica

Una modalidad de lubricación intermedia ocurre principalmente en los rodamientos de rodillos y en los engranajes



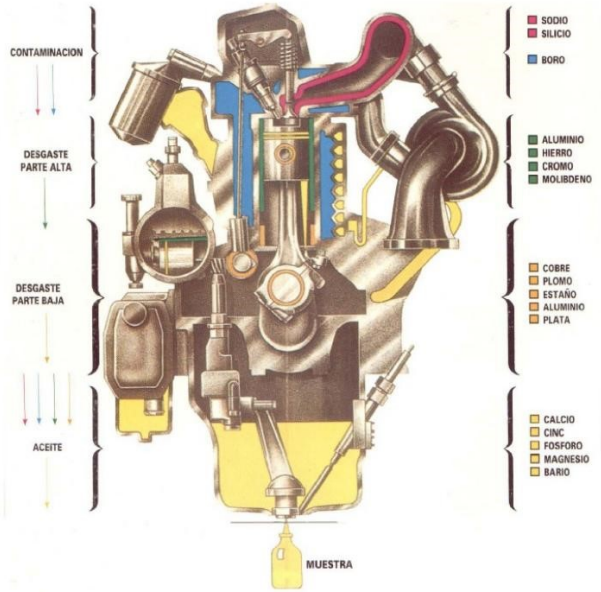


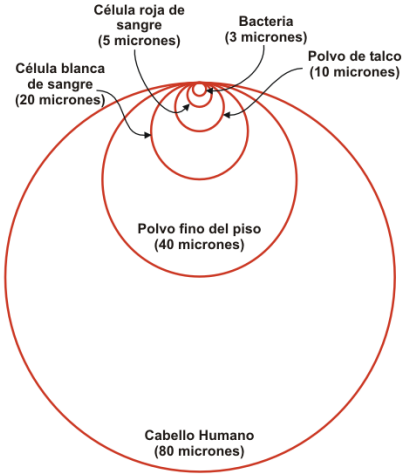
- Las superficies no-conformantes están sujetas a mucha carga que debe ser soportada por las áreas pequeñas
- Las superficies de los materiales en contacto se deforman momentáneamente y elásticamente bajo presión, dispersando así la carga a través de una superficie mayor
- La viscosidad del lubricante aumenta momentáneamente en forma dramática en altas presiones, aumentando así la habilidad de soportar carga en la zona de contacto

Lubricación Elasto-Hidrodinámica (EHD ó EHL)

- Las bolas y la pista del rodamiento se deforman elásticamente para incrementar el área de contacto.
- La película de aceite por lo general es menor a 1 micrón. Si quiere incrementar el espesor de la película al DOBLE, tiene que aumentar la viscosidad 4 VECES.
- Las presiones típicas de contacto (hasta 500,000 psi) convierten momentáneamente el aceite en un sólido en la zona de carga.
- La contaminación con partículas y agua destruyen la protección de la película lubricante.

CONTAMINACION



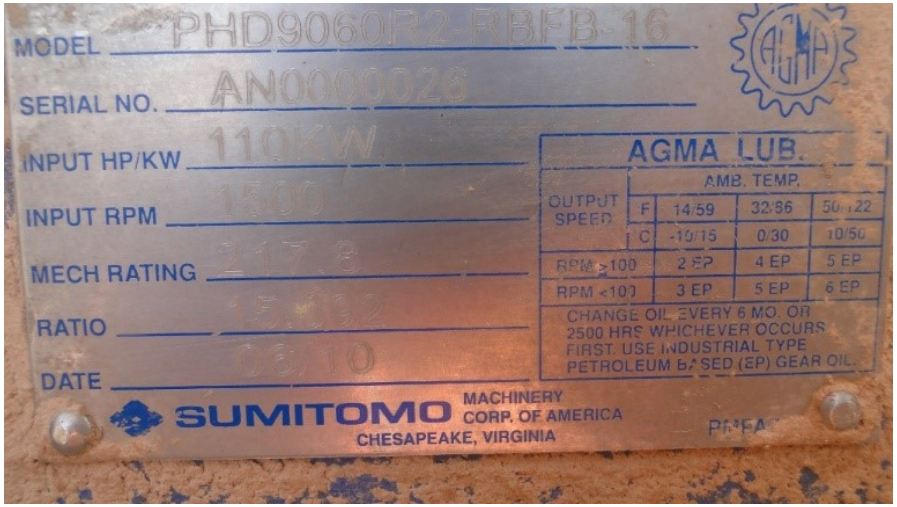


Tamaño		Número típico de partículas en 1 ppm
Micrones	Pulgadas	
3	0.00012	1036
5	0.0002	584
10	0.0004	183
20	0.0008	36
40	0.0016	5
80	0.0032	1

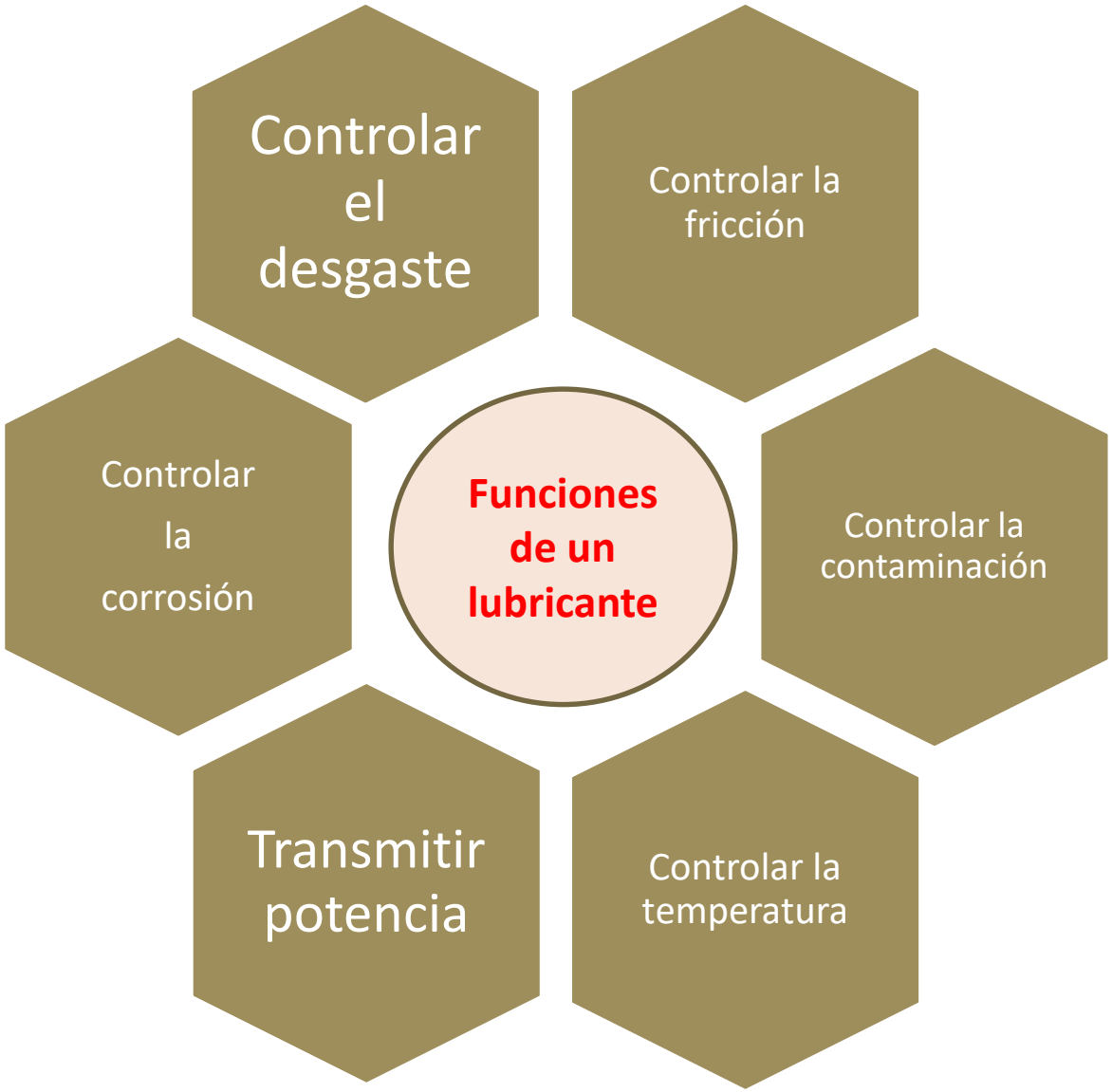
Mientras más Grande es la partícula ...

... Hay menos partículas

Micrones = micrómetros
1,000,000 micrones = 1 metro
25,400 micrones = 1 pulgada



INDUSTRIA


Controlar el desgaste
Controlar la fricción
Controlar la corrosión
Funciones de un lubricante
Controlar la contaminación
Transmitir potencia
Controlar la temperatura

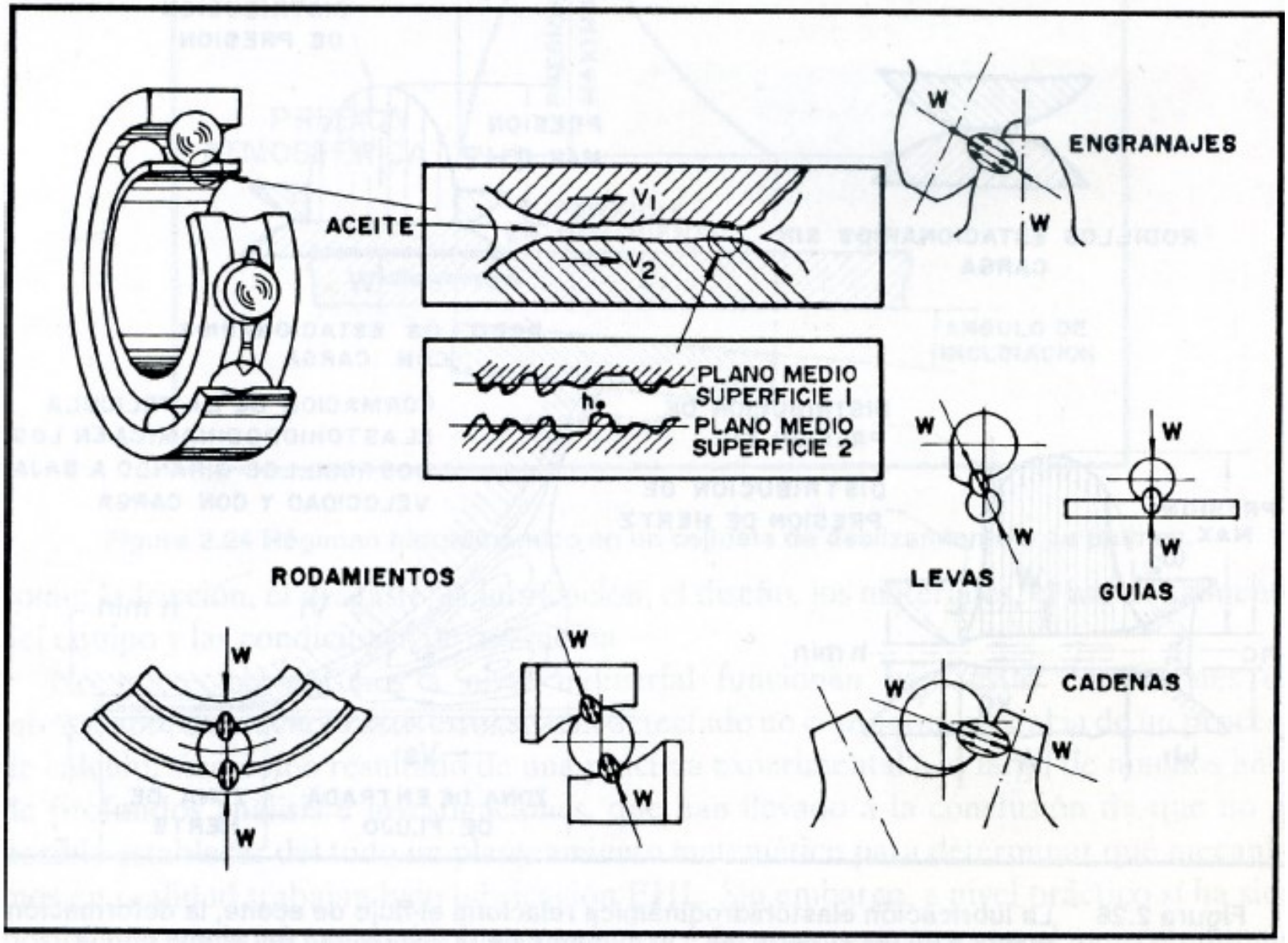
FRICCION

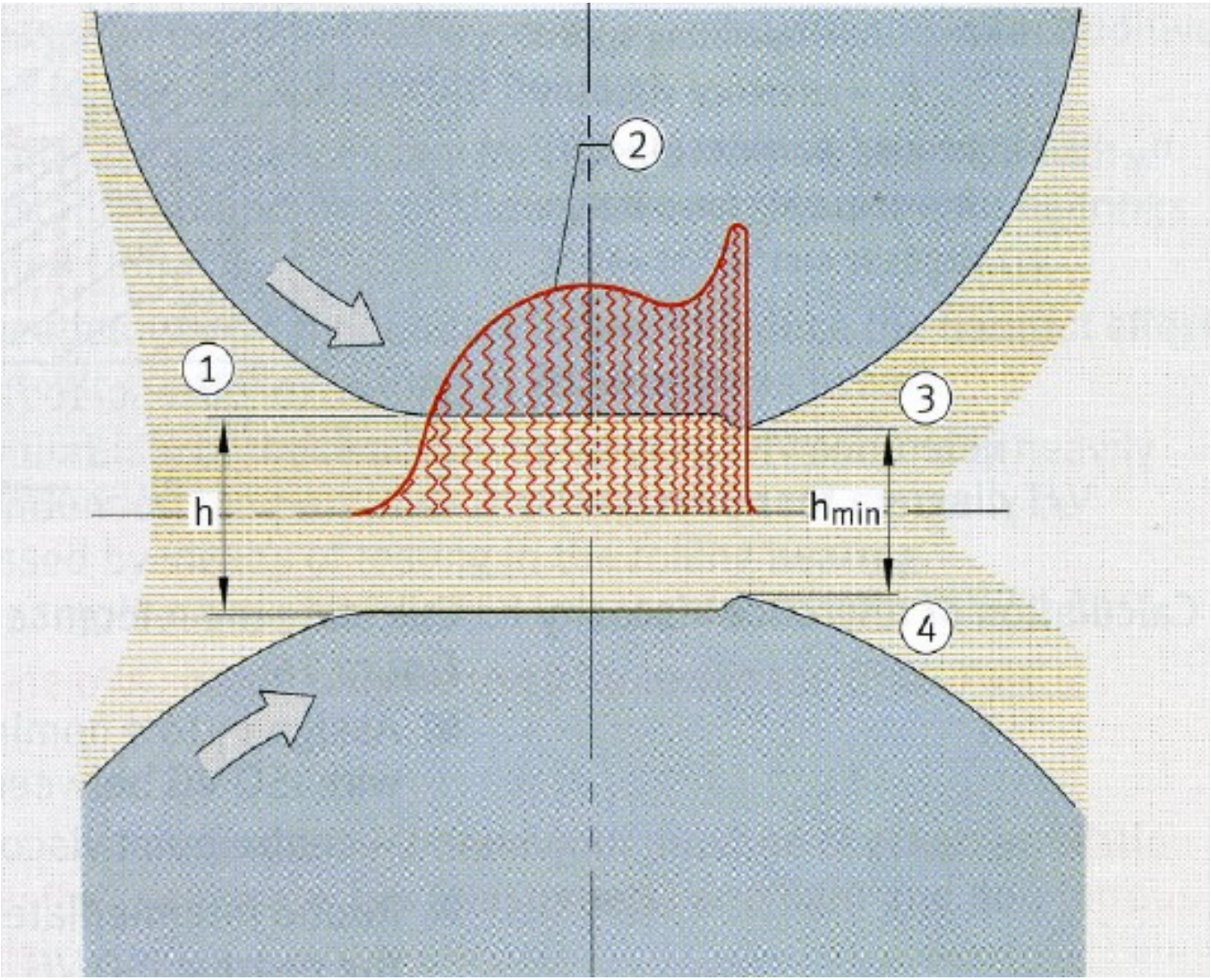
- Fricción de deslizamiento. Presenta las siguieentess características:
  - La fuerza de fricción F es proporcional al peso W del elemento que desliza: $F = \mu W$. El factor de proporcionalidad se denomina μ y se le llama coeficiente de roce.
  - F es independiente del área de contacto
  - F es independiente de la velocidad de deslizamiento
  - F varía de acuerdo a la naturaleza de los materiales y del acabado superficial
- Fricción por rodadura:
  - Varía con la carga
  - Es inversamente proporcional al diámetro del elemento rodante,
  - Es menor para superficies pulidas que para superficies rugosas

En lubricación EHL los aditivos de Extrema Presión (EP) utilizados deben tener una baja resistencia a la cizalladura tanto para condiciones de película límite (condición más crítica) como fluida (cuando se deforman elasticamente las crestas de las dos superficies). La eficiencia de estos aditivos depende de la velocidad con que reaccionen (reactividad) con las superficies metálicas, sin embargo si es muy reactivo en una aplicación donde no se necesita, es pajudicial, ya que se presentaría una excesiva corrosión química.

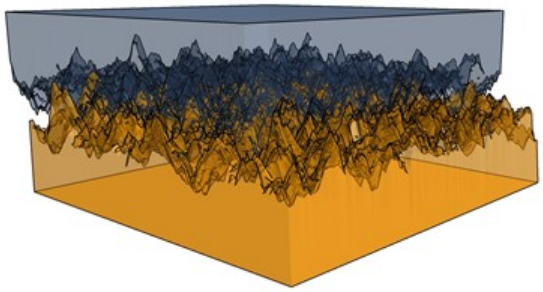
Los aditivos EP pueden ser de 1ra, 2da y 3ra generación, La utilización de uno u otro tipo dependerá del grado de desarrollo que tenga la Tribología y la Lubricación (liderazgo, programas, conocimientos, etc) dentro de la empresa en la cual se quiere implementar un programa de ahorro de energía y de disminución del desgaste basados en el control de la fricción.

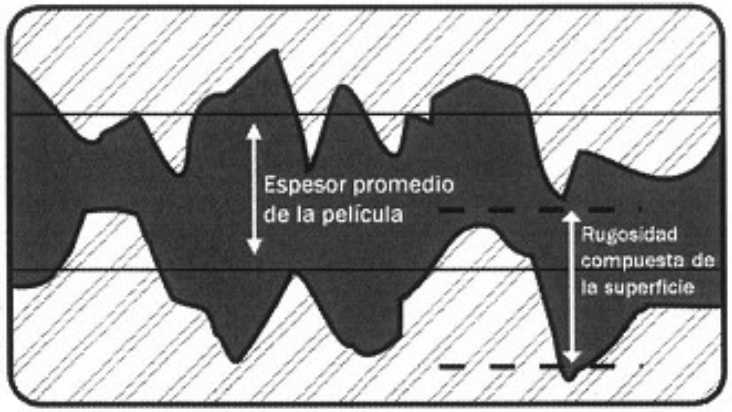
1.4.3. Para lubricacion Elastohidrodinámica (EHL)




2
1
3
h
hmin
4

ADITIVOS EXTREMA PRESION





- **PRIMERA GENERACION: TOTAL** **25% AREA**
- **SEGUNDA GENERACION: TOTAL** **40% ÁREA**
- **TERCERA GENERACION: TOTAL** **75% ÁREA**

PERDIDAS (ENERGIA) POR ROCE

FRICCION

- Fricción de deslizamiento. Presenta las siguieentess características:
  - La fuerza de fricción F es proporcional al peso W del elemento que desliza: $F = \mu W$. El factor de proporcionalidad se denomina μ y se le llama coeficiente de roce.
  - F es independiente del área de contacto
  - F es independiente de la velocidad de deslizamiento
  - F varía de acuerdo a la naturaleza de los materiales y del acabado superficial

- Fricción por rodadura:
  - Varía con la carga
  - Es inversamente proporcional al diámetro del elemento rodante,
  - Es menor para superficies pulidas que para superficies rugosas

1.5.3. Reductores de velocidad

$$CE = 0{,}7357P(1 - e_t) \quad , \quad CV$$

Donde

P: Potencia transmitida por el reductor de velocidad, CV.

e_t: Eficiencia total de la transmisión, adimensional.

e_i se calcula según:

$$e_t = e_{1-2}e_{3-4}.....e_{e1}e_{e2}e_{e3}.....e_{a1}e_{a2}.....e_n$$

$e_{1-2}, e_{3-4}, ...etc.$ representan la eficiencia del par de engranajes $1-2$, $3-4$, ..., etc.

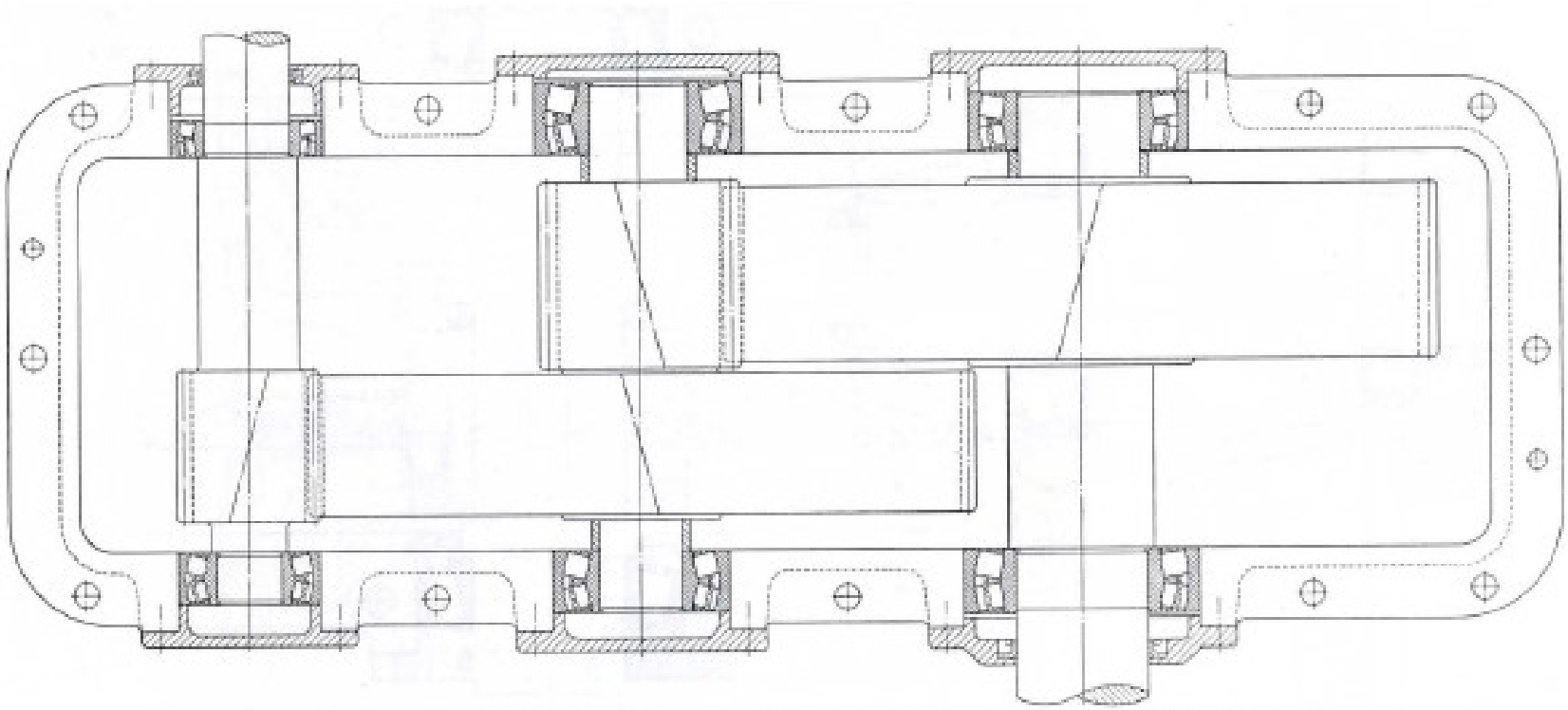
$e_{e1}, e_{e2}, e_{e3}, ..., etc.$ representan la eficiencia promedio de los rodamientos (o de los cojinetes lisos) 1 y 2 , 3 y 4, 5 y 6, etc., montados en los ejes $1, 2, 3$, ... etc., y se calcula en cada eje de la suma promedio de las eficiencias de cada rodamiento (o cojinete liso).

e_{a1}, e_{a2} , ... , etc. es la eficiencia equivalente del aceite salpicado (o que circula) por los engranajes $1, 2, 3$, ... , etc., que se sumergen parcialmente dentro del aceite.

e_n : eficiencia de otros elementos montados en el reductor de velocidad.

La eficiencia e_t es igual a $e = 1 - f$; donde f es el coeficiente de fricción que depende del tipo de película lubricante y se obtiene de la tabla que aparece en la figura 1.7

EJEMPLO



Reductor de velocidad con doble tren de engranajes cilíndricos

1.5.4. Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción del lubricante (sólido, fluido o combinado) es uno de los parámetros más importantes que se deben tener en cuenta cuando se seleccione el lubricante para una aplicación específica y depende del tipo de mecanismo que se vaya a lubricar.

En el caso de rodamientos es mucho menor que cuando se trata de cojinetes lisos, ya que en los rodamientos, sea la lubricación limite o EHL, las rugosidades *engranan* por la curvatura de los elementos radantes, mientra que en los cojinetes lisos, interactuan entre sí y están sometidas a deformación elástica. El valor del coeficiente de fricción se encuentra en el catálogo del fabricante del lubricante, en caso contrario es necesario consultarlo con él.

En la tabla de la figura 1.7 se especifican valores típicos de coeficientes de fricción para lubricacion límite, fluida y EHL en diferentes tipos de mecanismos. En caso de que no se conozca el coeficiente de friccion del lubricante que se va a utilizar se pueden usar los valores de esta tabla.

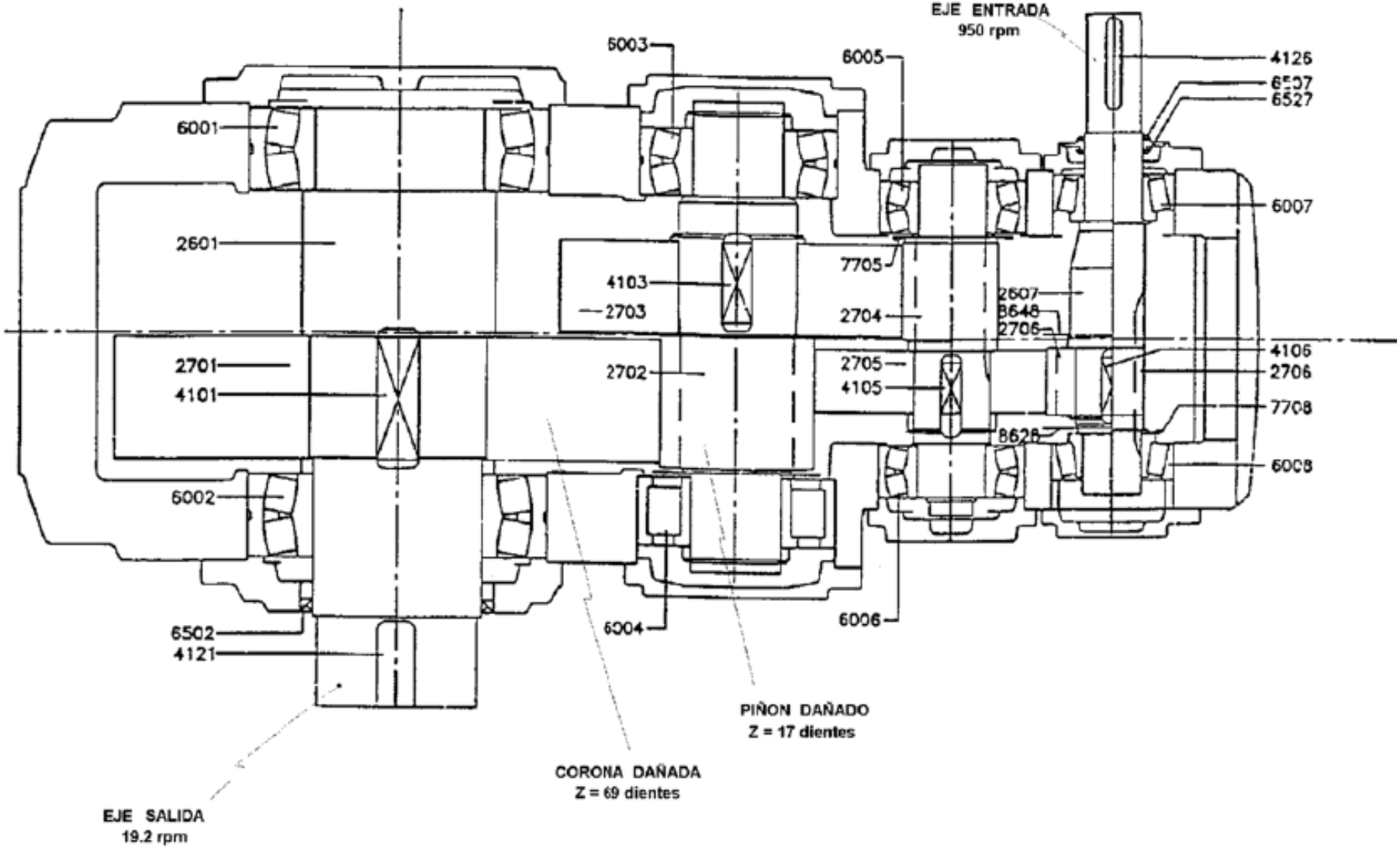
Mecanismo	Coeficiente de fricción									
	Sólida f_s		Fluida f_f		EHL f_e					
					Generación					
					1ra.		2da.		3ra.	
	Mineral	Sintético	Mineral	Sintético	Min.	Sint.	Min.	Sint.	Min.	Sint.
Rodamientos:										
- Rígido de bolas.	0.015	0.013	0.0085	0.00765	0.011	0.010	0.009	0.008	0.008	0.007
- De bolas de contacto angular.	0.020	0.018	0.0090	0.00800	0.014	0.012	0.012	0.011	0.011	0.010
- De bolas a rótula.	0.010	0.009	0.0080	0.00720	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006
- Axial de bolas.	0.013	0.011	0.0083	0.00740	0.010	0.009	0.009	0.008	0.008	0.007
- De rodillos cilíndricos.	0.011	0.009	0.0081	0.00720	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006
- De rodillos cónicos, esféricos y a rótula.	0.018	0.016	0.0088	0.00790	0.013	0.012	0.011	0.010	0.010	0.009
- De agujas.	0.022	0.019	0.0095	0.00850	0.015	0.013	0.013	0.012	0.012	0.011
Engranajes cilíndricos de dientes rectos y helicoidales.	0.045	0.040	0.0100	0.00900	0.027	0.024	0.024	0.022	0.022	0.020
Engranajes Sinfín - Corona.	0.065	0.058	0.0200	0.01800	0.042	0.038	0.038	0.034	0.036	0.032
Cojinetes lisos.	0.060	0.054	0.008 (2)	0.00720	0.034	0.030	0.030	0.027	0.028	0.025

Notas:

(1) Por lo regular los engranajes sinfín-corona no trabajan bajo condiciones de lubricación Hidrodinámica.

(2) Este coeficiente de fricción fluida se calcula más exactamente a partir del Número de Sommerfeld.

(3) El coeficiente de fricción equivalente fe para aceite salpicado por engranajes es de 0,010 y para aceite a presión es de 0,005.


EJE ENTRADA
950 rpm
6003
6005
4126
6507
6527
6001
6007
2601
7705
4103
2703
2704
2607
8648
2706
4106
2706
2701
4101
2702
2705
4105
7708
8628
6008
6002
6502
4121
6004
6006
PIÑON DAÑADO
Z = 17 dientes
CORONA DAÑADA
Z = 69 dientes
EJE SALIDA
19.2 rpm